

- 1.Филоненко-Бородич М.М. Простейшая модель упругого основания, способная распределять нагрузку // Сб. трудов МЭМИИТ. – 1945. – №53. – С. 92-108.
- 2.Пастернак П.Л. Основы нового метода расчета фундаментов на упругом основании при помощи двух коэффициентов постели. – М.: ГСИ, 1954. – 56 с.
- 3.Власов В.З. Строительная механика тонкостенных пространственных систем. – М.: Стройиздат. 1949. – 434 с.
- 4.Власов В.З., Леонтьев Н.Н. Техническая теория расчета фундаментов на упругом основании // Труды МИСИ. Вып.14 [154]. – М.: Стройиздат, 1956. – С. 12-31.
- 5.Лейбензон Л.С. Вариационные методы решения задач теории упругости. – М. - Л.: ОГИЗ - ГИТТЛ, 1943. – 286 с.
- 6.Васильков Г.В., Рапопорт Г.А., Шпитюк Е.Н. Квазидвухмерные расчетные схемы при конечноэлементной реализации модели упругого сжимаемого слоя.// Известия вузов. Строительство. – 1999. – №6. – С. 21-25.
- 7.Горбунов-Посадов М.И. Балки и плиты на упругом основании. – М.: Изд-во Министерства строительства предприятий машиностроения, 1949. – 238 с.
- 8.Сливкер В.И. К вопросу о назначении характеристик двухпараметрового упругого основания // Строительная механика и расчет сооружений. – 1981. – №1. – С.36-39.
- 9.Рапопорт Г.А., Шпитюк Е.Н. Методика определения численных значений параметров основания // Научно-технический отчет. – Ростов - на - Дону: РостовГЭП, 1997. – 56 с.
- 10.Канторович Л.В. Об одном прямом методе решения задачи о минимуме двойного интеграла // Изв. АН СССР. – 1933. – №5.

Получено 02.02.2004

УДК 624.073 : 691.88 : 621.886.6

В.В.ПОГРІБНИЙ, О.О.ДОВЖЕНКО, кандидати техн. наук, **В.Н.РОЖКО**
Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка

МІЦНІСТЬ ОБТИСНУТИХ БЕТОННИХ ШПОНОК ПРИ ЗРІЗІ

Запропонована методика розрахунку міцності обтиснутих бетонних шпонок при зрізі, що базується на варіаційному методі теорії ідеальної пластичності бетону і враховує вплив класу бетону, співвідношення розмірів шпонок, рівня обтиснення. Наводяться результати експериментальних досліджень.

Важливими конструктивними елементами несучих систем, які забезпечують спільну роботу конструкцій будівель і споруд, є стикові з'єднання, що сприймають зусилля зсуву. До таких відносять стики плит перекриттів і покриттів, з'єднання ригелів з колонами і колон з плитною частиною фундаментів, горизонтальні і вертикальні стики стінових панелей, контактні шви збірно-монолітних конструкцій, стики плит оболонок між собою і бортовими елементами та інші. На даний час граничне навантаження таких елементів визначається, як правило, за емпіричними залежностями, що не дозволяють враховувати специфіку напруженого стану стикових з'єднань.

Одним з факторів, що впливає на роботу шпоночкового стику, слід вважати величину обтиснення шпонок. Задача міцності обтиснутих

бетонних шпонок розв'язується на основі варіаційного методу теорії ідеальної пластичності бетону, розробленого в Полтавському національному технічному університеті ім. Юрія Кондратюка [1].

Метою роботи є вдосконалення розрахунку вказаних елементів та експериментальна перевірка отриманих теоретичних рішень.

Кінематично можлива схема руйнування зразка включає два диски (рис.1). Диск I переміщується відносно диску II зі швидкістю $V(V_x, V_y)$. Диски розмежовані поверхнею руйнування ABC (або поверхнею розриву швидкостей). На площадці BC діють граничні нормальні σ_u та дотичні τ_u напруження, які визначаються згідно умови міцності бетону Баландіна-Генієва [2]. Площадку АВ вважаємо за головну з напруженнями розтягу $\sigma_u = R_{bt}$.

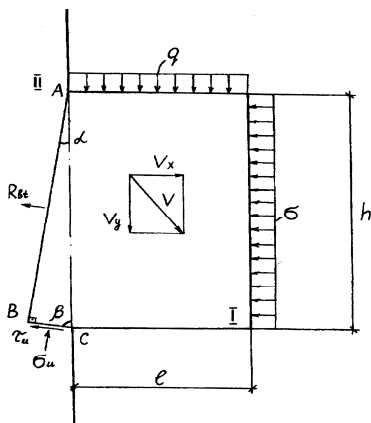


Рис.1 – Кінематично можлива схема руйнування обтиснутих бетонних шпонок при зрізі

Невідомими даної задачі є граничне навантаження q_u , кут нахилу α площадки АВ до вертикалі, кут нахилу β площадки ВС до вертикалі, відношення швидкостей $k = V_x / V_y$ (при розв'язанні задачі оперуємо відносними швидкостями, а не їх абсолютними значеннями).

Знаходимо розрив нормальної складової швидкості на площадці АВ

$$\Delta V_n = V_x \cos \alpha + V_y \sin \alpha. \quad (1)$$

Площа площадки АВ дорівнює
$$S_{AB} = \frac{htg\beta}{(tg\alpha + tg\beta)\cos\alpha}.$$

Відповідно розриви нормальної та дотичної складових швидкостей на площадці BC

$$\begin{aligned}\Delta V_n &= V_Y \sin \beta - V_x \cos \beta, \\ \Delta V_t &= V_x \sin \beta + V_Y \cos \beta,\end{aligned}\quad (2)$$

а її площа BC $S_{BC} = \frac{htg\alpha}{(tg\alpha + tg\beta)\cos\beta}$.

Записуємо функціонал для плоского напруженого стану

$$\begin{aligned}I_1 &= \int_{S_1} m \left[2B \left(1 + 0,25 (\Delta V_t / \Delta V_n)^2 \right)^{0,5} - 1 \right] \Delta V_n dS - \\ &\quad - \int f_i^* V_i dS - \int f_i V_i^* dS,\end{aligned}\quad (3)$$

де $B^2 = (1 + \chi / (1 - \chi)^2) / 3$; $\chi = R_{bt} / R_b$; $m = R_b - R_{bt}$; f_i^*, V_i^* – сили та швидкості, що задаються відповідно на ділянках S_f і S_V поверхні тіла $S = S_f \cup S_V$; S_1 – поверхня руйнування.

$$\begin{aligned}I &= m \left[2B \sqrt{1 + 0,25 \left(\frac{V_x \sin \beta + V_Y \cos \beta}{V_Y \sin \beta - V_x \cos \beta} \right)^2} - 1 \right] (V_Y \sin \beta - V_x \cos \beta) \times \\ &\quad \times \frac{htg\alpha}{(tg\alpha + tg\beta)\cos\beta} + \frac{R_{bt} (V_x \cos \alpha + V_Y \sin \alpha) htg\beta}{(tg\alpha + tg\beta)\cos\alpha} - q l V_Y + \sigma h V_x = 0.\end{aligned}\quad (4)$$

Після нескладних перетворень, вводячи позначення $k = \frac{V_x}{V_Y}$,

$\alpha = \frac{1}{h}$, маємо

$$\begin{aligned}I &= m \left[2B \sqrt{(tg\beta - k)^2 + 0,25 (1 + tg\beta tg\alpha)^2} - (tg\beta - k) \right] \frac{tg\alpha}{tg\alpha + tg\beta} + \\ &\quad + \frac{R_{bt} (k + tg\alpha) tg\beta}{(tg\alpha + tg\beta)} - q\alpha + \sigma k = 0.\end{aligned}\quad (5)$$

Задаючи обчислення σ , як частку навантаження q ($\sigma = k_1 q$), знахо-

димо граничне навантаження

$$\frac{q}{m} = \left(\frac{1 - k k_1}{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta} \right) \left[\left(2B \sqrt{(\operatorname{tg} \beta - k)^2 + 0,25(1 + \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \alpha)^2} - (\operatorname{tg} \beta - k) \right) + \right. \\ \left. + \frac{R_{bt}(k + \operatorname{tg} \alpha) \operatorname{tg} \beta}{m} \right]. \quad (6)$$

Додатковою умовою при пошуках мінімального значення граничного навантаження приймаємо умову рівноваги – рівності нулю суми моментів усіх зовнішніх та внутрішніх зусиль відносно осі, яка проходить через точку В.

Нормальні та дотичні напруження, що діють на площадці ВС, виражені через розриви швидкостей записуються у вигляді:

$$\sigma_u / m = 2(0,5 + \frac{B \Delta V_n}{\sqrt{(\Delta V_n)^2 + 0,25(\Delta V_t)^2}}), \tau / m = \frac{B \Delta V_t}{\sqrt{(\Delta V_n)^2 + 0,25(\Delta V_n)^2}} \\ \text{або}$$

$$\sigma_u / m = 2(0,5 + \frac{B(\operatorname{tg} \beta - k)}{\sqrt{(\operatorname{tg} \beta - k)^2 + 0,25(1 + \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \alpha)^2}}), \quad (7)$$

$$\tau_u / m = \frac{B(1 + \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \alpha)}{\sqrt{(\operatorname{tg} \beta - k)^2 + 0,25(1 + \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \alpha)^2}}. \quad (8)$$

Рівняння рівноваги має вигляд

$$\frac{R_{bt}}{m} \frac{\operatorname{tg}^2 \beta (1 + \operatorname{tg}^2 \alpha)}{(\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta)^2} + 2(0,5 + \frac{B(\operatorname{tg} \beta - k)}{\sqrt{(\operatorname{tg} \beta - k)^2 + 0,25(1 + \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \alpha)^2}}) \times \\ \times \frac{\operatorname{tg}^2 \alpha (1 + \operatorname{tg}^2 \beta)}{(\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta)^2} - 2 \frac{q l}{m h} (\frac{1}{2h} + \frac{\operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta}) + 2 \frac{k_1 q}{m} (0,5 - \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta}). \quad (9)$$

Для подальшого спрощення приймаємо передумову, що сума кутів α та β становить 90° ($\operatorname{tg} \alpha = 1/\operatorname{tg} \beta$).

Розв'язання задачі здійснено чисельними методами.

Експериментальні дослідження. У якості дослідних використовувалися хрестоподібні зразки (рис.2), в яких варіювався головний геометричний параметр шпонок: $\ell/h = 0,3$ (1 зразок); 0,4 (2 зразки); 0,5 (2 зразки); 0,6 (3 зразки). Дані співвідношення довжини шпонки до її висоти були вибрані таким чином, щоб виключити у експериментальних дослідженнях випадки руйнування шпонок від зминання та згину. Усього було випробувано 8 зразків.

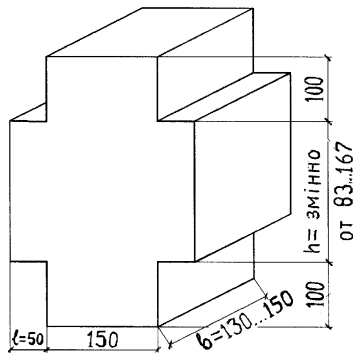


Рис.2 – Загальний вигляд дослідного зразка

Для виготовлення зразків використовувався звичайний важкий бетон. Із одного і того ж замісу разом із зразками виготовлялися контрольні стандартні куби з ребром 150 мм і призми 150х150х600 мм, за результатами випробування яких визначалися характеристики міцності бетону.

Деформації бетону в зоні руйнування вимірювалися за допомогою тензорезисторів із базою 20 мм (на кожному зразку наклеювалося 20 тензорезисторів). У якості реєструючого приладу використовувався автоматичний вимірювач деформацій (АВД).

Одиночні шпонки випробовувалися у пресі ПГ-125 (рис.3). Навантаження здійснювалося двома рівними силами, прикладеними симетрично до бокових виступів зразків (до шпонок) по верхнім горизонтальним граням. Верхня грань стовбура зразка була вільною від навантаження, а до нижньої опорної грані приклеювалася на епоксидному компаунді сталеві пластина товщиною 20 мм для підсилення опорної частини зразка. Обтиснення шпонок здійснювалося до прикладання зовнішнього навантаження за допомогою спеціального пристрою, який складався з пластин з отворами і тяжів. Рівень обтиснення контролювався за допомогою тензорезисторів, які були наклеєні на тяжках пристрою.

Навантаження здійснювалося ступенями. На кожному ступені досліджувалася область зразка поблизу площини зрізу з фіксацією деформацій і пошкоджень.

Усі дослідні зразки руйнувалися по цілому бетонному перерізу, який був розташований поблизу площини зрізу. Характер руйнування зразків представлений на рис.4.

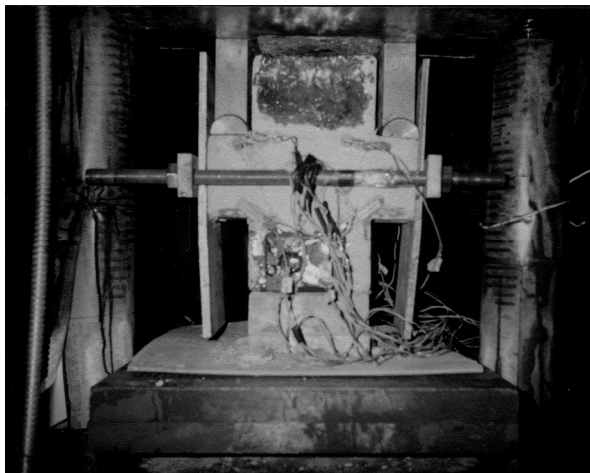
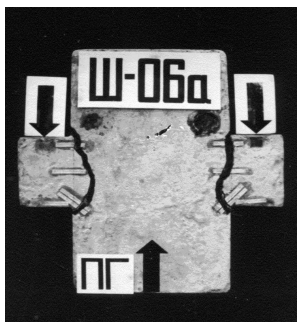
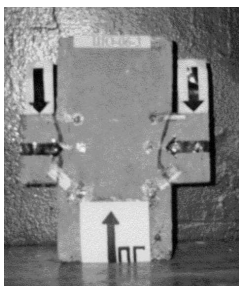


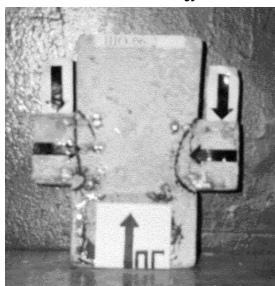
Рис. 3 – Зразок у пресі під час випробування



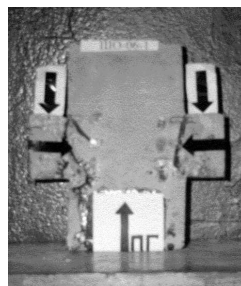
a



б



в



г

Рис. 4 – Характер руйнування зразків Ш-06а і ШО-06 при різних рівнях обтиснення:
a – без обтиснення; *б* – при $\sigma/m=0,1$; *в* – при $\sigma/m=0,2$; *г* – при $\sigma/m=0,35$.

Утворення тріщини, яка визначала поверхню руйнування, починалося при $0,9Q_u$. До цього при навантаженні $(0,5-0,7)Q_u$ виникала тріщина під кутом $10 \div 30^\circ$ до вертикалі, яка починалася у верхньому куті з'єднання шпонки зі стовбуром і потім розповсюджувалася усередину стовбура.

Таким чином, обтиснення принципово не змінює характер руйнування шпонок, вони руйнуються шляхом зрізу. Дослідний опір зрізові суттєво залежав від співвідношення розмірів шпонок ℓ/h та рівня обтиснення σ/R_b (зростає із зменшенням ℓ/h і із збільшенням σ/R_b). Характер руйнування відповідає прийнятій кінематично можливій схемі руйнування шпонки при розв'язанні задачі міцності (рис.1).

На рис.5 представлені найбільш характерні графіки, побудовані за результатами обробки даних тензорезисторів, які дають змогу оцінити деформований стан зразків при навантаженні.

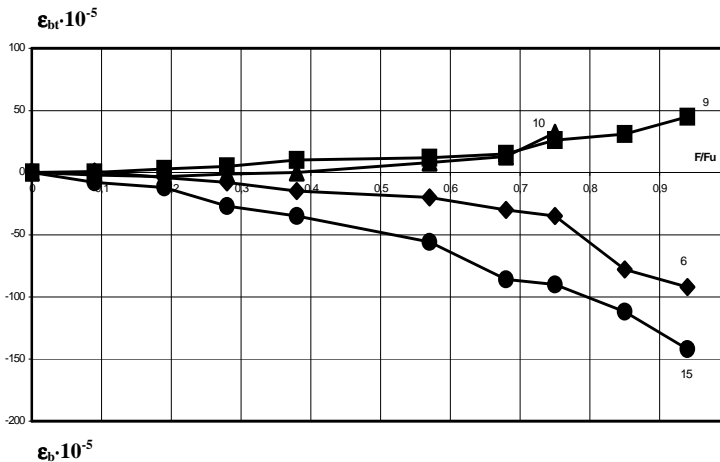


Рис.5 – Деформації бетону шпонки ШО-06-1 поблизу площини зрізу:
10, 9, 6, 15 – номери тензорезисторів відповідно біля верхньої грані та посередині висоти шпонки (в зоні розтягу), біля нижньої грані горизонтально та під кутом 45° (в зоні стиску)

Тензорезистори, які розміщені в стиснутій зоні шпонок (біля нижнього кута з'єднання зі стовбуром) показують досить великі деформації на ступенях, які передують руйнівному навантаженню (рис.5). Крім того розміри областей пластичності досить невеликі, а показання тензорезисторів базою 20 мм усереднювали деформації і занизили реальні деформації стиску цих областей.

Наведені результати можуть служити обґрунтуванням застосування передумови ідеальної пластичності до бетону при розв'язанні задачі міцності обтиснутої бетонної шпонки при зрізі.

При порівнянні дослідної і теоретичної міцностей шпонок з важкого бетону при зрізі з обтисненням рівень обтиснення σ/m змінювався в межах від 0,02 до 0,35 при призмівій міцності зразків $R_b=10,12 \div 30,82$ МПа. Для 23 зразків (з них 15 інших дослідників [3, 4]) отримані такі статистичні характеристики: середнє арифметичне

$$\bar{x} = \frac{R_{sh}^{calc}}{R_{sh}^{test}} = 0,94$$
, середнє квадратичне $\sigma_{n-1} = 0,176$, коефіцієнт варіації $v = 18,7\%$.

Отже, запропонована методика розрахунку міцності обтиснутих бетонних шпонок при зрізі, яка базується на варіаційному методі теорії ідеальної пластичності бетону і враховує вплив класу бетону, співвідношення розмірів шпонок, рівня обтиснення. Методика є досить простою, реалізується на ЕОМ, легко може бути засвоєна проектувальниками і студентами.

Результати проведених експериментальних досліджень підтвердили прийняту в теоретичних рішеннях кінематично можливу схему руйнування шпонок, а також передбачений розрахунком вплив визначальних факторів. Міцність шпонок суттєво збільшується із зростанням рівня обтиснення та зменшенням головного геометричного параметра шпонок l/h .

Теоретична міцність шпонок добре погоджується з дослідною.

1. Митрофанов В.П. Вариационный метод теории идеальной пластичности бетона // Строительная механика. – 1990. – №2. – С. 23- 26.

2. Гениев Г.А., Киссюк В.Н., Тюпин Г.А. Теория пластичности бетона и железобетона. – М.: Стройиздат, 1974. – 316 с.

3. Коровин Н.Н., Еськов В.С. Шпоночные стыки сборных железобетонных оболочек // Промышленное строительство. – 1966. – № 8. – С. 25 - 29.

4. Рохлин И.А., Бондарев В.А. Исследование и расчет бессварочных шпоночных стыков тонкостенных железобетонных конструкций. – К.: НИИСК Госстроя СССР, 1968. – 34 с.

Отримано 23.02.2004